

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05235

研究課題名(和文) 高密度プラズマ中のプラズマ波診断

研究課題名(英文) High density plasma measurement by using frequency domain interferometer

研究代表者

小瀧 秀行 (KOTAKI, Hideyuki)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所 光量子科学研究部・上席研究員(定常)

研究者番号：60354974

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：高強度レーザーがプラズマ中に入射すると、プラズマ中の電子が振動し、ウェーク場ができる。レーザープラズマ相互作用研究において、発生する粒子は、このプラズマ振動で変わってくる。また生成粒子を制御するには、このプラズマ振動の制御が必要である。その制御には、プラズマ振動測定が必要であるが、ほとんどできていない。そこで、周波数干渉計を用いてプラズマ波振動計測を行った。本研究により、シングルショットでのプラズマ振動計測に成功した。

研究成果の概要(英文)：Laser acceleration is an application of high intense laser. The laser accelerated electron beam has a short pulse width as the order of femto second. The laser acceleration has a possibility to open new physics. To use the electron beam, the stability and the control of the beam is one of the problems. To control the beam, the control of the plasma wave is necessary. To control the plasma wave, the wave should be measured. As a first, we measure the plasma wave. By using two chirped probe pulses, frequency domain holographic (FDH) measurement is conducted. In the case of FDH, the spectrum can be converted to time. FDH is one of the single-shot plasma wave measurements. To produce the plasma wave, 10 TW and 30 fs laser pulse is focused onto a Helium gas jet. Without plasma wave, the interference fringes are straight. However, with plasma wave, the fringes are shifted. From the shift, the plasma density can be calculated. As a result, single-shot plasma wave measurement is succeeded.

研究分野：ビーム物理

キーワード：プラズマ振動 周波数干渉計 レーザー加速

1. 研究開始当初の背景

最近のレーザー科学の進展により、PWはもとより 10PW のレーザーが実用化されつつある。このようなレーザー開発によって、 10^{22}cm^{-3} 以上のプラズマ密度の生成が可能になる。このようなレーザープラズマから、フェムト秒オーダーの極短パルスの高輝度な量子ビームが生成される。このような量子ビーム生成のメカニズムの解明・最適化及び、高密度プラズマそのものの理解には、プラズマ状態の観測が必要不可欠である。これまで、プローブ光を用いた周波数干渉計及び周波数干渉ホログラフィーが 10^{18}cm^{-3} 未満の比較的低密度プラズマについては成功している(例えば、[1-4])。しかし、 10^{18}cm^{-3} の密度を超える領域では、申請者の知る限り成功性が報告されていない。その理由は、プラズマ密度が高くなると、プラズマ波の波長そのものが短くなるため測定が困難になる。さらに、プラズマによるプローブ光の屈折等の影響が大きくなるためプローブ光の散乱や、プローブ光の波長変調が起き、計測を困難にするためである。また、プラズマ波も線形領域から非線形領域になるため解析が困難になっていく。

2. 研究の目的

10^{18}cm^{-3} を超える高密度プラズマの新しい計測方法を提案した。プラズマによる屈折・変調の影響を評価するために、プローブ光としてチタンサファイアレーザーの基本波、2倍波、3倍波を用いる。その後、2倍波または3倍波を用いて周波数干渉計及び周波数干渉ホログラフィーによるプラズマ計測を行い、屈折・変調の影響を補正する。本科研費では、この方法の有効性を実証し、 10^{18}cm^{-3} を超える高密度領域で初めてプラズマを測定することを目的とする。

3. 研究の方法

まず、プローブ光のプラズマによる影響の測定を行った。プラズマの屈折等の影響によりプローブレーザー光が散乱・変調を受ける。チタンサファイアレーザーの基本波、2倍波、3倍波を用いて、この影響を測定する。

次に、上の結果を元にプローブ光を選定し、周波数干渉計及び周波数ホログラフィーによるプラズマ計測を行う。周波数領域の干渉計は、空間干渉計に比べて、非常に高分解能での計測が可能となる。プラズマ振動の計測においては数%の振動の計測が、そして、空間分解能は「波長/(集光距離/レーザー直径)」となるため、プローブ光の波長の10分の1程度の空間分解能が得られる。この周波数領域の干渉計測を行うことにより、高分解能でのプラズマ波計測を行う。

周波数干渉計を用いたプラズマ波計測について説明する。周波数干渉には、時間差のある2つの同軸プローブ光が必要となる。この2つの光をスペクトロメーター中で干渉

させると、周波数領域の干渉が起こり、干渉縞ができる。2つのプローブ光のうちの1つを真空中、もう片方をプラズマ中にする、干渉縞の位相シフトが起こり、このシフトよりプラズマ密度を求めることができる(図1)。ここで、このプローブ光をチャープする(図2)。そうすることで、波長から時間への変換ができるようになり、シングルショットでの測定が可能となる。

4. 研究成果

まず、プローブ光のプラズマによる影響を調べた。メイン光により生成された 10^{18}cm^{-3} 以上のプラズマにプローブ光を斜め入射すると、プローブ光は散乱されてしまい、ほとんどプラズマ中に入っていく。しかしながら、同軸入射の場合、プローブ光はプラズマ中を抜けてくる。そこで、メイン光との合成および分離のし易さ、変換後の光量より、プローブ光として2倍波を用いることとした。

周波数干渉計測には、プローブ光が2本必要なため、メイン光1本、プローブ光2本の計3本を同軸にする。方法に関しては、基本波用ミラーの裏側よりプローブ光を入射し、プローブ光とメイン光を同軸にする。プローブ光とプラズマとの相互作用後、2倍波用の誘電体多層膜ミラーでメイン光とプローブ光を分離する。プローブ光とメイン光のタイミングは、直線ステージで調整する。2つのプローブ光の生成は次のように行った。その概念を図3に示す。まず、メイン光から切り

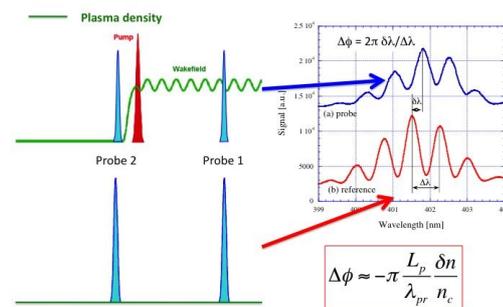


図1 周波数干渉計測

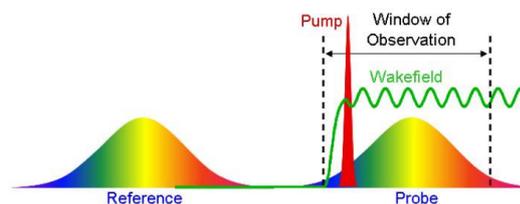


図2 チャープパルスを用いた周波数干渉計測

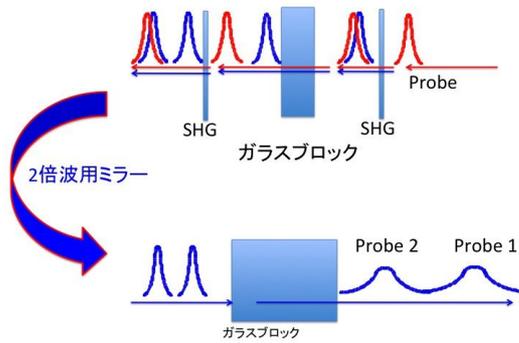


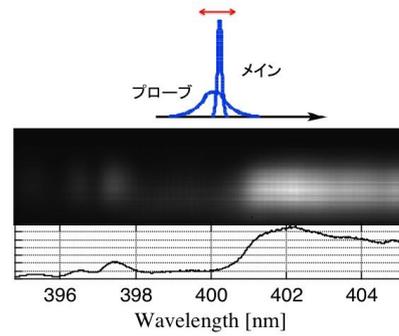
図3 同軸プローブ光の生成

出したプローブ光を、SHG 結晶を通して2倍波をつくる(プローブ光の1部が2倍波となる)。次に薄いガラスプレートを通すことにより基本波と2倍波に時間差をつける。さらにSHG結晶を通すことにより、2つの同軸プローブ光を生成する。2倍波用の誘電体多層膜ミラーを用いて基本波を取り除き、厚いガラスブロックを通すことでチャープした2つのプローブ光を生成した。この方法を用いることにより、ジッターフリーの2プローブ光を生成し、計測に使用した。

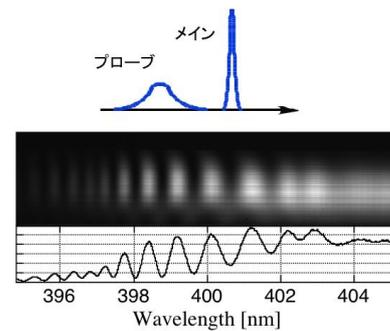
シングルショット計測において、チャープ量は重要な情報の1つである。そこで、メイン光と片方のプローブ光との周波数干渉を計測し、そこからチャープ量を求めた。図4に計測結果、図5に解析結果を示す。図4(a)は、メイン光がプローブ光の中にある場合で、2つの光のタイミングを変化させながら計測することで、チャープ量を求めた。図4(b)は、メイン光がプローブ光の外にある場合で、干渉縞の間隔よりチャープ量を求めた。この結果が図5であり、この結果より、波長と時間の変換を行う。

図6に周波数干渉計を用いての、シングルショットプラズマ波計測結果を示す。図6(a)は、プラズマのない状態であり、きれいな干渉縞である。図6(b)は、プラズマありの状態であり、干渉縞の中心部分に、プラズマによる位相シフトが観測された。このときのプラズマ密度は、 $3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ である。このプラズマ密度は、プラズマ生成のためのガスジェットのガス密度分布より求めた値である。

図7に中心部分の解析結果を示す。波長から時間への変換は、図5の結果を用いた。このように、周波数干渉計を用いて、シングルショットでのプラズマ振動の計測に成功した。密度を変化させたときの結果や、2次元での解析に関しては、自動解析の手法およびプログラムの検討中である、今後、進めていく予定である。



(a)



(b)

図4 チャープ量計測

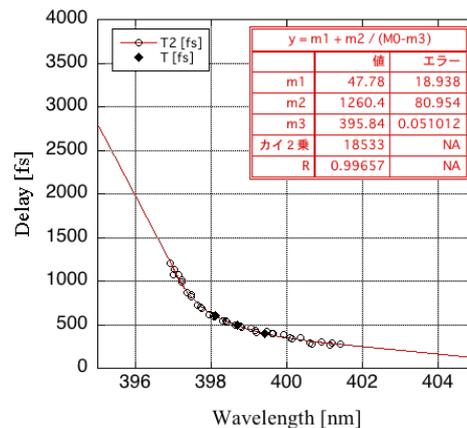
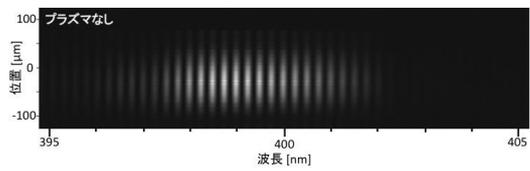


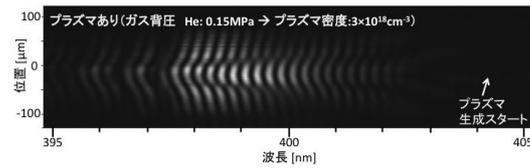
図5 チャープ量計測結果

<引用文献>

[1] C. W. Siders, et al., "Laser wakefield excitation and measurement by femtosecond longitudinal interferometry", Phys. Rev. Lett. Vol.76, 3570-3573 (1996).



(a) プラズマなし



(b) プラズマあり ($3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)

図6 周波数干渉縞

[2] J. R. Marquès, et al., “Temporal and Spatial Measurements of the Electron Density Perturbation Produced in the Wake of an Ultrashort Laser Pulse”, Phys. Rev. Lett. Vol.76, 3566-3569 (1996).

[3] H. Kotaki, et al., “Direct measurement of coherent ultrahigh wakefields excited by intense ultrashort laser pulses in a gas-jet plasma”, Phys. Plasmas Vol.9, 1392-1400 (2002).

[4] N. H. Matlis, et al., “Snapshots of laser wakefields”, Nature Phys. Vol.2, 749-753 (2006).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4件)

K. Huang, T. Esirkepov, J. K. Koga, H. Kotaki, M. Mori, Y. Hayashi, N. Nakanii, S. V. Bulanov, and M. Kando,

“Electro-optic spatial decoding on the spherical-wavefront Coulomb fields of plasma electron sources”, Scientific Reports, 2018, 査読有, Accepted DOI:10.1038/s41598-018-21242-y

Takehito Hayakawa, Tatsufumi Nakamura, Hideyuki Kotaki, Masaki Kando, and

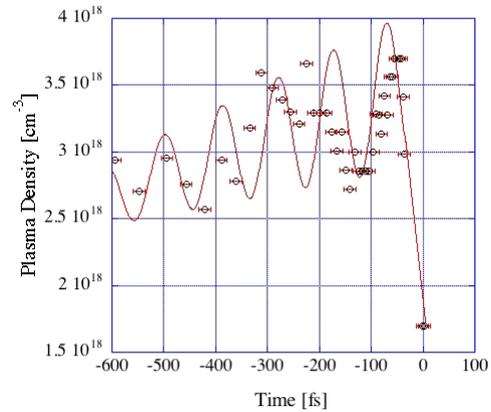


図7 周波数干渉計により計測したプラズマ振動

Toshitaka Kajino, “Explosive Nucleosynthesis Study Using Laser Driven g-ray Pulses”, Quantum Beam Sci., 査読有, Vol.1, 2017, 3 DOI:10.3390/qubs1010003

Hideyuki Kotaki, Yukio Hayashi, Michiaki Mori, Masaki Kando, James K. Koga, and Sergei V. Bulanov,

“Limitation of the plasma channel due to the frequency blueshift”, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol.688, 2016, 012054 DOI:10.1088/1742-6596/688/1/012054

Hideyuki Kotaki, Keigo Kawase, Yukio Hayashi, Michiaki Mori, Masaki Kando, James K. Koga, and Sergei V. Bulanov, “Direct Observation of the Pulse Width of an Ultrashort Electron Beam”, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, Vol.84, 2015, 074501 <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.074501>

[学会発表](計 9件)

小瀧 秀行、森 道昭、林 由紀雄、黄 開、中新 信彦、神門 正城、周波数干渉計を用いたプラズマ波計測、第65回 応用物理学会 春季学術講演会、早稲田大学、2018年3月17日-20日

小瀧 秀行、森 道昭、林 由紀雄、黄 開、
中新 信彦、神門 正城、同軸プローブによる
プラズマウェーク場測定、レーザー学会
学術講演会 第 38 回年次大会、京都市勧業
館みやこめっせ、2018 年 1 月 24 日-26 日

H. Kotaki, M. Mori, Y. Hayashi, K. Huang,
N. Nakanii, and M. Kando, "Single shot
measurement of the plasma wave", 光・
量子ビーム科学合同シンポジウム 2017,
大阪大学 銀杏会館 阪大吹田キャンパス),
2017 年 5 月 9 日-10 日

Hideyuki Kotaki, Michiaki Mori, Yukio
Hayashi, K. Huang, Nobuhiko Nakanii,
and Masaki Kando, "Single Shot
Measurement of the plasma wave by using
Frequency Domain Holographic",
INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH ENERGY
DENSITY SCIENCES 2017, Yokohama, 18-21
April, 2017

小瀧 秀行、森 道昭、林 由紀雄、黄 開、
中新 信彦、神門 正城、周波数干渉計によ
るプラズマ波計測、日本物理学会 第 72
回年次大会、大阪大学豊中キャンパス、
2017 年 3 月 17 日-20 日

小瀧 秀行、森 道昭、林 由紀雄、黄 開、
中新 信彦、神門 正城、周波数干渉計を用
いたプラズマ波計測、レーザー学会学術講
演会第 37 回年次大会、徳島大学常三島キ
ャンパス、2017 年 1 月 7 日-9 日

小瀧 秀行、森 道昭、林 由紀雄、黄 開、
中新 信彦、神門 正城、周波数干渉計を
用いたウェーク場測定、光・量子ビーム科
学合同シンポジウム、千里ライフサイエ
ンスセンター、2016 年 11 月 24 日-25 日

Hideyuki Kotaki, Yukio Hayashi,
Michiaki Mori, Masaki Kando, James K.
Koga, and Sergei V. Bulanov,
"Measurement of electron oscillation
by a plasma wave and a laser pulse",
Symposium on Advanced Photon Research,
Kyoto, Japan, October 15-16, 2015

Hideyuki Kotaki, Yukio Hayashi,
Michiaki Mori, Masaki Kando, James K.
Koga, and Sergei V. Bulanov, "Effect of
Frequency Blueshift on the Plasma
Channel", INTERNATIONAL CONFERENCE ON
HIGH ENERGY DENSITY SCIENCES
2005, Yokohama, Japan, April 22-24, 2015

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小瀧 秀行 (KOTAKI, Hideyuki)
国立研究開発法人量子科学技術研究開発
機構・関西光科学研究所 光量子科学研究
部・上席研究員
研究者番号：60354974

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

森 道昭 (MORI, Michiaki)
国立研究開発法人量子科学技術研究開発
機構・関西光科学研究所 光量子科学研究
部・上席研究員
研究者番号：10323271

(4) 研究協力者

()